

OKAYAMA University
Earth Science Reports,
Vol. 14, No. 1, 1-9, (2007)

2004 年の台風による瀬戸内海の高潮について

Storm surge in the Seto Inland Sea accompanied by Typhoons in 2004

浅沼友光(Tomomitsu Asanuma)^{1),2)}・塚本 修(Osamu Tsukamoto)¹⁾

小川貢司(Kouji Ogawa)³⁾

In 2004, Seto Inland Sea coast suffered severe damages of storm surge. This area never experienced storm surge damage in recent half century and people were not ready for the storm surge. In two typhoons of T0416 and T0418, surge anomaly were more than 150cm in Bisan-Seto area. Storm surges appeared after the maximum approach of typhoon not only due to surface low pressure but also due to wind stress as westerly. Because of geographical complexity of Seto Inland Sea, the surge process have not been well understood. Therefore, it is necessary to study the effects of the wind and the surface pressure using a numerical model. Atmospheric model MM5 and ocean model POM were used as a numerical experiment, including the astronomical tide model NAO.

As the results of numerical simulation of the storm surge, atmospheric conditions were well simulated but ocean model was rather complex. There are a lot of island in Seto Inland Sea and sea water movement in the model was very much influenced by the topography and wind stress effect appeared much smaller. In the no-island model, storm surge height was a little improved. However the simulated surge height was still less than the observed height. Further improvement of the ocean model application should be considered in future studies.

Keywords : Typhoon, Storm Surge, Seto Inland Sea, surface pressure, wind stress

I. はじめに

2004 年(平成 16 年)には、10 個の台風が日本に上陸するという記録を残し、各地に様々な被害を与えた。岡山県北部では広域の広戸風によって倒木被害などが顕著であったが、岡山県南部の瀬戸内海沿岸においては、台風 16 号、18 号によって 50 年ぶりという高潮の激甚な被害が発生した。特に台風 16 号では、死者 1 名、負傷者 16 名、床上浸水 5152 戸、床下浸水 5752 戸にのぼり、記録的な被害となった。そこでこの 2 つの台風による高潮について各地の記録を収集して高潮の実態を調査した。

そして、これらの高潮の発生した状況を空間的・時間的に解明するために、当時の気象・海洋の状況を数値モデルで再現することを試みた。

II. 資料調査

本研究で用いたデータは以下のものである。

- ・岡山地方気象台、気象庁および国土地理院の HP
- ・岡山県、国土交通省岡山河川事務所の検潮記録
- ・各観測点での潮位、気圧、風向、風速
- ・岡山県、地域住民による高潮調査の写真やデータ
- ・高潮被害の歴史(文献調査)

ここで用いた潮位・気象観測点は以下に示すとおり。



図 1 気象庁の観測地点

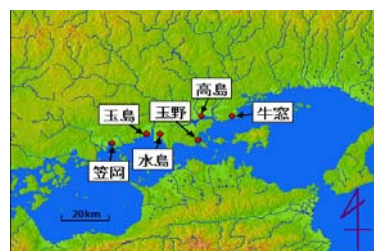


図 2 岡山県管理の観測地点

1) 岡山大学大学院自然科学研究科 〒700-8530 岡山市津島中 3 丁目 1-1

2) 出雲土建(現在所属)

3) 岡山理科大学(現在所属:滋賀県警)

III. 過去の高潮被害

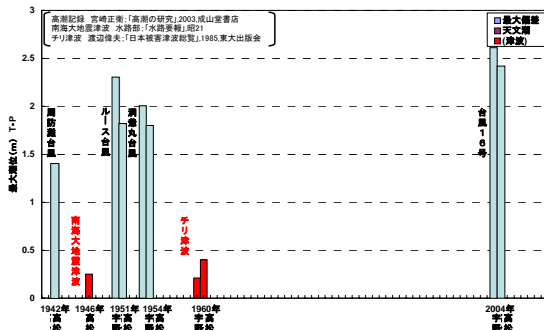


図3 宇野・高松における最近 60 年間の潮位記録

図3は宇野と高松における最近 60 年間の高潮の潮位記録である。なお参考のために最近記録された津波の波高も示してある。この記録の範囲内では津波より高潮の方がはるかに大きな潮位上昇をもたらしている。1954 年の洞爺丸台風から 2004 年の 16 号台風まで 50 年間大きな高潮被害が無かったため、瀬戸内海沿岸の住民の警戒心がほとんど失われていたと考えられる。

IV. 観測データの解析

図4のグラフは 2004 年の台風 16 号接近時における、図1の観測地点での気圧と潮位偏差を示したものである。神戸と松山では、気圧が最低になったとほぼ同時に、潮位偏差が最高値になっているのに対して、宇野と高松は気圧が最低になった時から 2～3 時間遅れて潮位偏差が最高値になっている。同年の台風 18 号も台風 16 号同様、岡山の北西を通過し、同じような経路を通った台風であるが、宇野と高松で気圧の最小値と潮位偏差の最高値の出現時刻に 2～3 時間の遅れがあった。

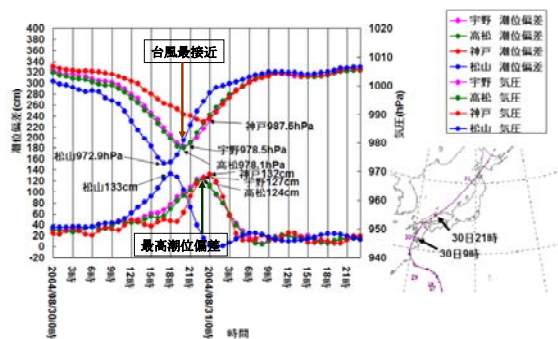


図4 台風 16 号による気圧と潮位偏差

図5、図6のグラフは台風 16 号、18 号における図2に示した岡山県沿岸各地の潮位偏差である。台風 16 号の方が台風 18 号に比べ潮位偏差が全体的に高いことがわかる。また、岡山の西に位置する笠岡・水島・玉島は他の地点よりも潮位偏差が高くなっている。図7を見ると、台風 16 号、台風 18 号の時も再接近時を境に風向が南東から南西に変化し、宇野、高松で激しい南西風が吹いていた。これと同様に笠岡、水島、玉島でも強い南西風が吹いていたと思われる。笠岡・水島・玉島は他の観測地点より南からの吹走距離が長いので、吹き寄せ効果が大きく潮位偏差が大きくなったと考えられる。また台風 16 号、台風 18 号の両方をみても牛窓の値は他の地域よりも小さくなっている。その原因は牛窓の南側に小豆島があり吹き寄せ効果の影響が少ないためと考えられる。

図8に示すように台風が岡山県の北側を東進すると、瀬戸内海中央部ではまず南東風による播磨灘からの吹き寄せで海水が移動する。続いて台風最接近後には南西風による燧灘からの吹き寄せより備讃瀬戸では潮位が上昇する。また気圧低下に伴う海水面上昇域も台風の進行にともなって移動する。いずれの潮位上昇効果も、大量の海水移動を伴うので備讃瀬戸付近に最高の潮位偏差をもたらすまでに時間的遅れが生じると考えられる。

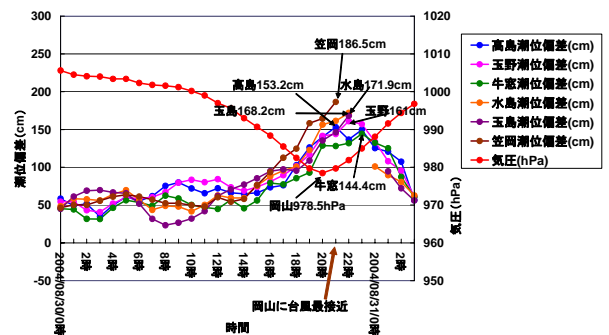


図5 岡山県沿岸各地の潮位偏差(台風 16 号)

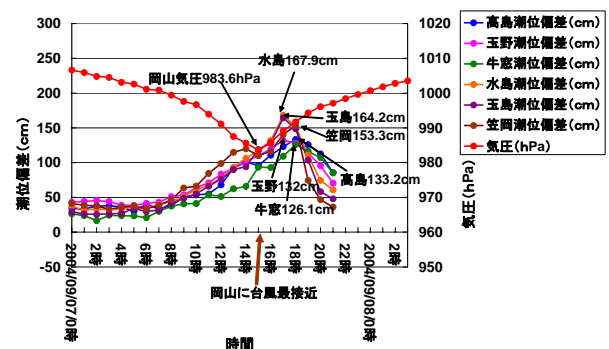


図6 岡山県沿岸各地の潮位偏差(台風 18 号)

2004 年の台風による瀬戸内海の高潮について



図7 宇野と高松の台風接近時の風向風速
(気象庁 HP より)

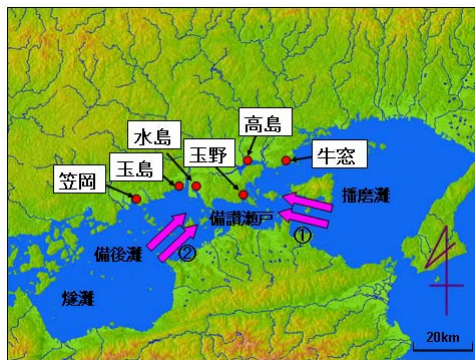


図8 岡山の観測地点と風向

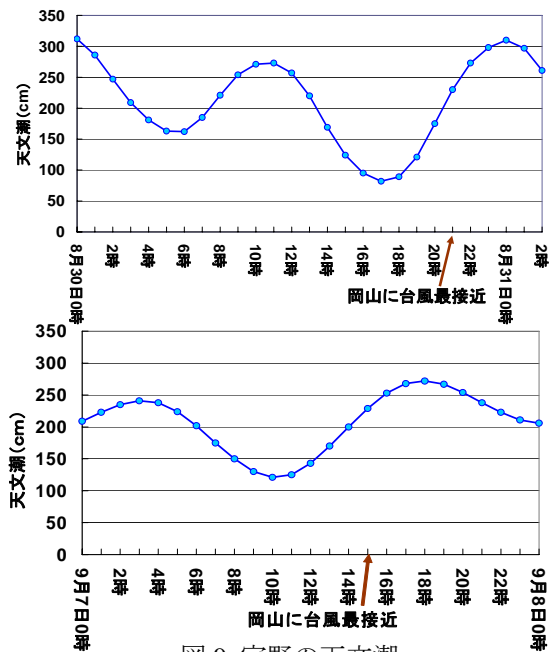


図9 宇野の天文潮
(上:台風16号, 下:台風18号)

図9は台風16号接近時と18号接近時の天文潮である。どちらも満潮時付近で台風が最接近しているのがわかる。また台風16号時は夏の大潮の時期と重なり、台風18号時よりさらに天文潮が高くなっていた。

V. 高潮による被害



図10 岡山県の被害調査地点

図11は台風18号接近時の勇崎地区〔図10参照〕での堤防が決壊する前と後の写真である。水位の上昇で海水が防波堤を超えて破壊されたことがわかる。



図11 台風18号による勇崎地区での水位上昇〔上〕と防波堤の破壊〔下〕

VI. 高潮の数値シミュレーション

瀬戸内海は地形が複雑なため、高潮の発生過程や高潮の実態を具体的に把握することは、これまでほとんど行われていなかった。しかし今回のような大きな被害が起こりうることから、高潮の発生予測をすることは必要かつ重要である。

本研究では、備讃瀬戸における高潮の発生過程および、高潮における気圧と風の効果を調べるため、2004 年に備讃瀬戸の北側のルートを通った台風 16 号と南側のルートを通った台風 23 号について瀬戸内海における高潮の数値実験をおこなった。

数値モデルとして NCAR で開発された非静水圧大気モデル MM5 と、Princeton 大学で開発された海洋モデル POM を利用した。MM5 の計算領域を最も小さいもので図 12 のような瀬戸内海が入る領域にし、水平格子間隔は 2km とした。POM も同じ領域で計算をおこなった。

瀬戸内海全体の状況を把握するため、瀬戸内海周辺の領域も計算領域に入れ、台風 0416 号は 2004 年 8 月 29 日 00 時～8 月 31 日 00 時、台風 0423 号は 2004 年 10 月 19 日～10 月 21 日のどちらも 2 日間について計算を行った。大気モデル MM5 の初期条件および境界条件には NCEP 全球客観解析データに台風ボーガスを与えたものを、海洋モデル POM の初期条件および境界条件には MM5 で出力した、風速、気圧のデータ及び、海洋潮汐モデル NAO を使用した。

MM5: 5th generation PSU/NCAR Mesoscale Model

(PSU: Pennsylvania State University/NCAR:

National Center for Atmospheric Research)

POM: Princeton Ocean Model (Princeton University)

NAO: 国立天文台

National Astronomical Observatory

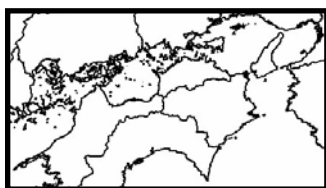


図 12. MM5 の計算領域

1. 台風の経路

台風 16 号、23 号における観測値とモデルの経路の比較を図 13, 14 に示す。台風 16 号が九州に上陸した 8 月 30 日 9 時の時点ではモデルと観測値はほぼ同じ場所であるが、上陸した直後から MM5 で計算した方が北に位置している。しかし、備讃瀬戸に台風が最接近した時刻がほぼ同じことから、台風の進行速度は良く再現されているのではないと思われる。

台風 23 号については多少のずれがみられるものの全体的によく一致している。しかし細かく見ると、先ほどの台風 16 号同様、上陸した直後、観測値と MM5 の台風の経路が異なり、20 日 18 時～21 時に MM5 の方が観測値よりも、一時間程度先に位置している。

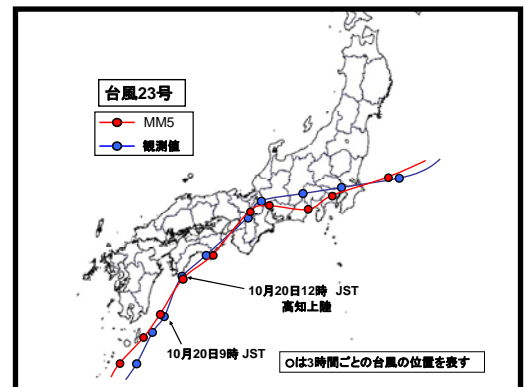


図 13 台風 16 号経路:MM5と観測値の比較

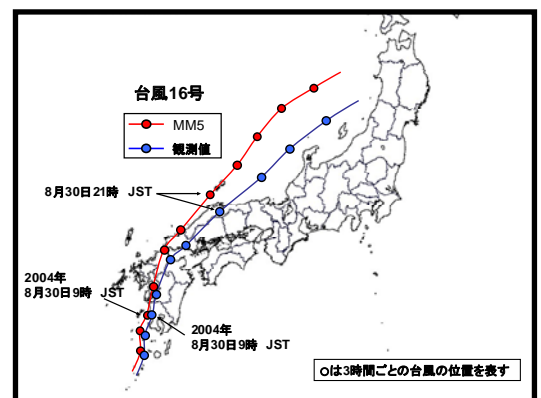


図 14 台風 23 号経路:MM5と観測値の比較

2. 台風 16 号の気象場のシミュレーション

(1) 気圧の比較

図 15 に高松、岡山における観測値と MM5 の気圧の時系列変化を示す。図より、高松の観測値は 30 日 9 時あたりから気圧が徐々に下がり始め、20 時に最低気圧 978.1hPa を記録した。MM5 も同様な気圧の低下をしており、20 時に最低気圧 980hPa であった。また、岡山では 15 時まで MM5 の方が観測値に比べて少し低い値を示しているが、最接近時は観測値も MM5 もほぼ同じ値となった。どちらもわずかではあるが、観測値の方が MM5 より最低気圧の値が低い。

2004 年の台風による瀬戸内海の高潮について

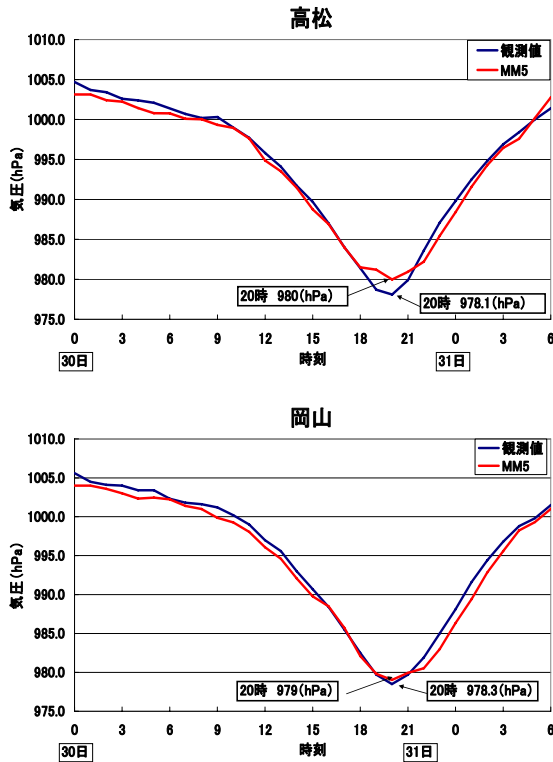


図 15 台風 16 号における高松・岡山での MM5 と観測値との気圧の比較

(2) 風速の比較

観測値および MM5 の結果における高松, 岡山の風速の時系列変化を図 16 に示す。高松, 岡山の観測値では, それぞれ 31 日 01 時に風速 14.6m/s, 31 日 00 時に風速 16.8m/s を記録した。また, 台風接近時より 3~4 時間程度遅れて風速が急激に強くなっている。MM5 における風速の時系列変化をみると, 高松では 31 日 00 時に 14.3m/s, 岡山では 14.4m/s で観測値と比べて少し低い値をとったが, 変化のしかたはよく似ている。

(3) 台風 16 号についての再現性の検討

台風 16 号について MM5 を用いて計算した結果をおおまかにみると, 台風の経路は MM5 の方が観測値より北に位置しているが, 台風接近時の気圧の低下や風速のピークはよく再現できた。気圧の時系列変化を細かくみると, どちらも台風接近時に MM5 の方が観測値よりも気圧が低下しているのがわかる。これは MM5 で計算した台風の経路が北に位置しているため, MM5 の方が観測地よりの距離が遠くなっているためだと考えられる。

MM5 における風速の時系列変化では, どちらも 30 日 21 時頃風速が急激に低下し, その後いきなり強風が吹き, 約 2 時間後にはまた急激に弱くなるなど, 現実の気

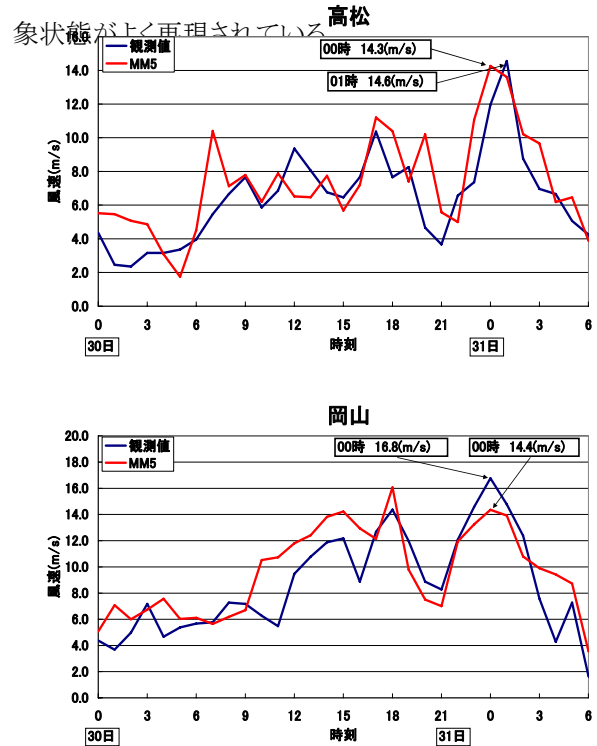


図 16 台風 16 号における高松・岡山での MM5 と観測値との風速の比較

3. 台風 23 号の気象場のシミュレーション

(1) 気圧の比較

図 17 に高松, 岡山における観測値と MM5 の気圧の時系列変化を示す。観測値と MM5 の結果を比較すると, モデルの方が観測値よりも最低気圧を記録するのが 1 時間程度早かった。観測値と MM5 の最低気圧の値を比べても多少の差はあるが, 接近時に急激に気圧が下がることや, 岡山より高松の方が最低気圧が低いところなど良く再現されている。また, 台風通過後, 観測値と MM5 の気圧の差が大きくなった。

(2) 風速の比較

観測値およびモデルの結果における高松, 岡山での風速の時系列変化を図 18 に示す。高松, 岡山の観測値では 20 日 10 時から風が強くなり始め, 高松では 15 時に風速 10m/s, 岡山では 18 時に 20m/s を記録した。また, 台風が通過した後も 2~3 時間程度, 風が強い状態が続いた。一方, MM5 の方は同じような風速の立ち上がり方をみせてはいるが, 台風の通過した後は急速に風速が減少している。

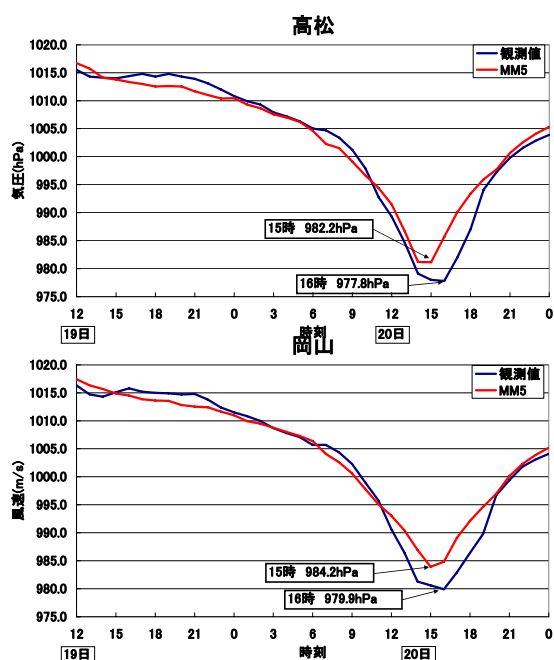


図 17 台風 23 号における高松・岡山での MM5 と観測値の気圧の比較

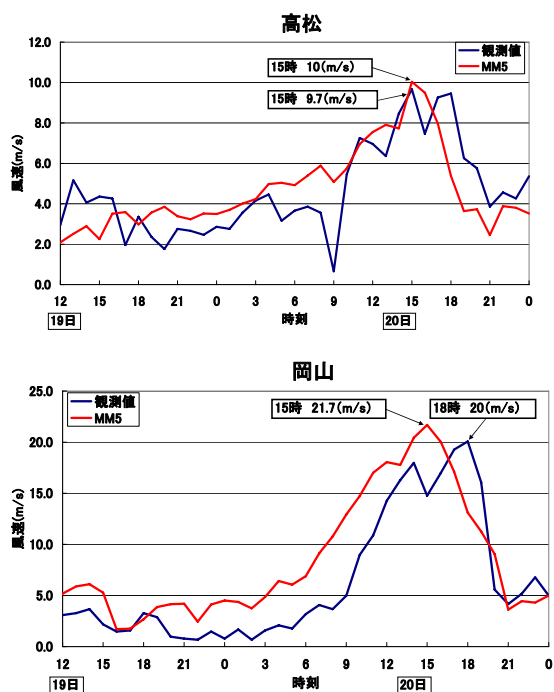


図 18 台風 23 号における高松・岡山での MM5 と観測値の風速の比較

(3) 台風 23 号についての再現性の検討

台風 23 号について MM5 を用いて計算した結果をおおまかにみると、台風接近時に風速が強くなっていく過程や接近時に気圧が急激に低下するところなど良く再現されている。しかし、データを細かくみると、台風が通過してから観測値と MM5 の気圧の差が大きくなっている。これは経路の比較のところで説明したとおり、台風が上陸した 10 月 20 日 12 時あたりから MM5 の方が観測値よりも台風の手が速くなり、観測値よりも早く台風が通過したためだと考えられる。風速も台風が早く通過した影響がみられ、観測値では台風通過後も 2~3 時間程度風が強い状態が続いたが、MM5 の方は台風の通過した後は急速に風速が減少している。

4. 海洋モデル POM

備讃瀬戸で高潮の発生原因には、外海から内海への海水流入が大きく関わっており、数値実験によりこれを再現するためには、瀬戸内海全体を視野に入れ、外海から備讃瀬戸への海水流入を考えることが必須となる。そのため、対象となる備讃瀬戸のみならず瀬戸内海や、太平洋の方までを含めた広い計算範囲を設ける必要がある。今回の計算範囲の水深は深いもので数千 m、浅いもので数 m と水深差が極めて大きくなる。 σ 座標系(海底地形に沿って計算格子を区切る方法)は、このような条件であっても複雑な海底地形を正確に再現できる点で非常に有効である。そこで本研究では、静水圧分布、Boussinesq 近似を仮定した σ 座標系の準 3 次元数値モデルであるプリンストン大学の Princeton Ocean Model (POM) を使用した。POM の特徴として 2 次元計算と 3 次元計算を別々に行い、水位を陽的に解くことのできる mode-split 法がある。この方法を採用するとタイムステップの制約を緩やかにすることができ、計算効率を向上させる。

今回、現実に近い海水流動を計算するため、MM5 によって非常によく再現されていた風と気圧のデータを海洋モデル POM に適用し、大気-海洋を一つの系として計算した。POM の計算範囲および計算条件をそれぞれ図 19、表 1 に示す。

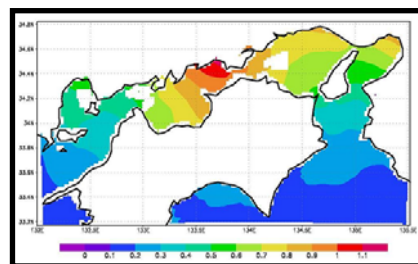


図 19 POM の計算範囲

2004 年の台風による瀬戸内海の高潮について

表 1 POM の計算条件

	台風16号	台風23号
調査期間	2004年8月30日～9月1日	2004年10月20日～10月22日
水平解像度	2km	
水平格子間隔	南北方向 90 東西方向 159	
σ 座標の適用領域数	30	
入力された初期条件	風・気圧：MM5で出力されたデータ 水深：JODCの水平間隔500m毎のデータ	

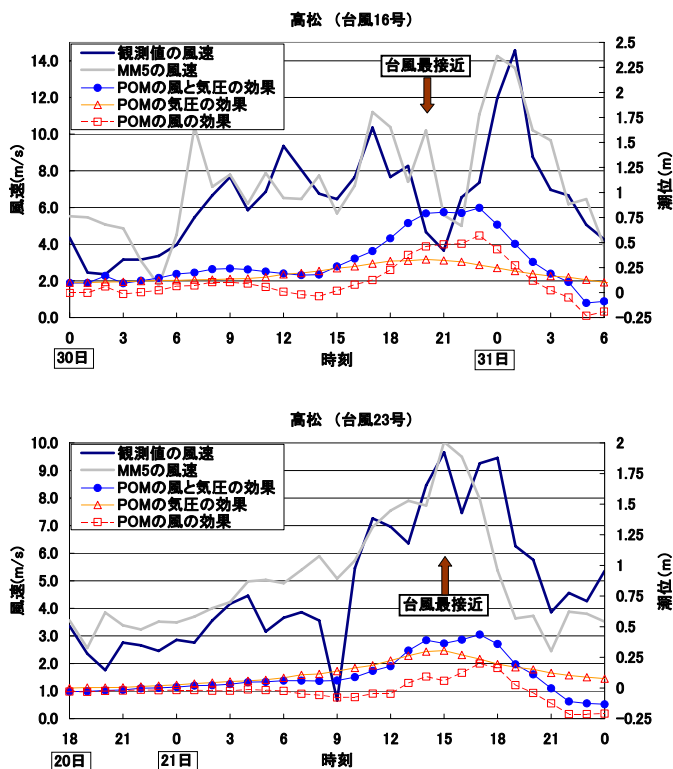


図 20. 台風 16 号(上)と台風 23 号(下)における、数値モデルで再現された風速と潮位の比較〔高松〕

図 20(上)に高松における台風 16 号での数値モデルで再現された風速と潮位の比較を示す。風速の時系列変化を比較すると 30 日 21 時頃風速が急激に低下し、その後いきなり強風が吹くところなど、現実の気象状態をよく再現できた。また、高潮による気圧と風の効果をみると風の効果が気圧の効果より大きいのがわかる。これは燧灘、備後灘からの南西風により、大量の海水が備讃瀬戸に集中したためだと考えられる。

図 20(下)に台風 23 号における風速と潮位の比較を示す。風速の時系列変化を比較すると、徐々に風速が強

なり、台風接近時に最大になるところなど、よく再現されている。しかし、観測値は台風が通過した後も 2～3 時間程度、風が強い状態が続いている。潮位をみると、接近時に風よりも気圧の効果の方が大きい。これは小豆島の影響により、吹き寄せ効果が軽減されたためだと考えられる。

VII. まとめと今後の課題

【観測データ】

台風 16 号、台風 23 号も神戸、高松では気圧の低下と同時に潮位偏差が最大になったのに対し、備讃瀬戸周辺の宇野、高松では潮位偏差の最大が台風最接近時より 3 時間程度遅れた。

台風が備讃瀬戸の北西を通る台風 16 号の時は、対象海域は危険半円側に入るので、南東を通過する台風 23 号の時より潮位が高かった。

【大気モデル MM5】

MM5 と観測値の比較において台風 16 号に関しては MM5 の経路が少し北に位置したものの、風速が台風最接近時よりも 3 時間程度遅れて最大になったことや気圧の低下は非常に再現性が良かった。台風 23 号に関しては最接近時のあたりで MM5 における台風の通過が観測値より一時間程度早かったため、台風通過後に MM5 の気圧は観測値より早く上昇し、風速が観測値より早く低下した。

台風接近と同時に風速が立ち上がる所や、最接近と同時に気圧が急激に低下する点など、再現性は高いと思われる。

【海洋モデル POM】

宇野、高松における観測された潮位偏差と POM による潮位を比較したところ、台風 16 号はどちらも台風が接近するにつれて急に潮位が上昇し、台風最接近時から 3 時間程度遅れて最大となった。これは MM5、観測値ともに台風最接近時から 3 時間程度遅れて風速が最大になったためだと考えられる。台風 23 号は、台風が接近するにつれて観測値と POM のどちらも急に潮位が上昇する点は似ているが、MM5 の風速が台風通過後に急激に減少するため、POM による潮位のピークが観測値による潮位偏差とは異なった。

風と気圧による潮位上昇を、それぞれの効果に分けた場合、台風 16 号は気圧より風の効果が大きかった。これは、南西風に対する対岸距離が長く、安芸灘、伊予灘、燧灘から吹き寄せられた大量の海水が備讃瀬戸のあたりに集中したことによることがわかった。

台風 16 号の高松、宇野における島無しモデルと島有りモデルの風の効果を比較すると島無しの方が 7cm 程度、

潮位が高くなる。これは、備讃瀬戸の島を取り除いたことにより、備讃瀬戸の西側から東側に海水が流入しやすくなったためだと考えられる。

島の無い場合は島の有る場合に比べて海水の通りが良くなるため、台風 16 号、台風 23 号ともに NAO の値が気象庁の発表している天文潮位の値に近くなる。

【今後の課題】

・MM5

今回の研究では、台風 16 号、台風 23 号共に最接近時の台風の経路の再現性がよくなかった。そのため、台風 16 号、台風 23 号共に観測値より MM5 の気圧の方が高い値を示し、台風 23 号については台風通過後の風速の再現性がよくなかった。高潮には風、気圧などの気象の変化による影響が非常に大きいことがわかったので、まずは MM5 で計算した台風 16 号、台風 23 号の経路を観測値に近づけてやる必要がある。そうすることで瀬戸内海の高潮の状況をよく再現したシミュレーション結果が得られるはずである。台風の経路を合わせる方法として、本研究では 6 時間おきに与えている台風ボーガスを、もっと細かくとってやる方法が有効ではないかと考えられる。

・POM

本研究では水平格子間隔を 2km に設定したが、備讃瀬戸や広島県南部のような狭い地域を計算する場合 2km では格子間隔が大きすぎることがわかった。つまり、計算された島の面積が現実の島と比べて過大評価してしまい瀬戸内海全体の海水の流入、流出がうまく再現されなかった。水平格子間隔を 2km のままで、今よりさらに良く再現するためには、備讃瀬戸と広島県南部の島を、現実の島の面積と同じになるように取り除くか、もしくは備讃瀬戸と広島県南部の水深を深くして、そこに通過する流量を現実の値に近くしてやる操作が必要であると考えられる。高野ら(2007)では瀬戸内海の島を取り除き、備讃瀬戸あたりの地形を削り、瀬戸内海全体の海水の通りを良くした仮想実験をおこなっている。また、実測潮位を算出するため、異常潮位も組み込んだモデルの研究も必要である。

今回の 16 号 18 号に限らず、今後より大きな高潮災害が起こる危険性があるため、将来の高潮頻発の懸念に備えて、海水温の上昇、地域的な地盤沈下、灘・湾の共振状態の変化などの研究や上昇程度の定量的予測、モデルの検討などが今後の重要な研究課題である。

謝辞

最後に本研究をするにあたって資料収集に協力して下さった、岡山地方気象台、国土交通省岡山河川事務所の皆様や県会議員の赤坂てる子氏他、多くの住民のみなさんに感謝いたします。

また本研究を進めるにあたって協力していただいた、岡山理科大学の北岡豪一教授、奥田節夫教授に厚く御礼申しあげます。また数値モデル研究については広島大学大学院国際協力研究科の山下隆男教授はじめ同研究科の大学院生の皆様にたいへんお世話になりました。心より感謝いたします。

参考文献

- 浅沼 友光(2007): 2004 年の台風に伴う備讃瀬戸周辺における高潮の数値実験, 平成 18 年度岡山大学大学院自然科学研究科修士論文
- 小川貢司(2005): 備讃瀬戸沿岸における高潮の実態, 平成 16 年度岡山理科大学理学部基礎理学科卒業論文
- 高野洋雄, 鎌倉和夫, 峰松宏明, 依岡幸広, 久重和久, 清水栄一, 佐藤祐一, 福永昭史, 谷脇由彦, 谷條薫一(2006): 2004 年の台風 16 号(Chaba)による瀬戸内海における高潮の発生メカニズム, 日本気象学会 天気, 53, No11 5-15.
- 宮崎正衛(2003): 高潮の研究 その実例とメカニズム 成山堂書店
- 吉岡洋, 山下隆男, 中村久重, 芹澤重厚, 土屋義人(1995): 台風 9426 号による高潮について, 京都大学防災研究所年報 第 38 号 B-2